

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.03.007

多壁碳纳米管薄膜增强聚间二甲苯己二酰胺复合材料

郭欣,李迎春,王文生,孟祥宁

(中北大学材料科学与工程学院,太原 030051)

摘要: 多壁碳纳米管薄膜(BP)可以提升材料的力学性能和导热、导电性能,在制备热塑性复合材料方面具有巨大的应用潜力。采用先溶液浸渍后热压成型的方法制备了聚间二甲苯己二酰胺(MXD6)/BP复合材料,研究了BP含量对复合材料热导率、电导率、拉伸强度的影响。利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)证实了碳纳米管和MXD6之间存在的 π - π 共轭效应,并用扫描电子显微镜(SEM)观察了MXD6在碳纳米管周围的分布。使用差示扫描量热(DSC)法和热重(TG)分析表征了复合材料的结晶性能和热稳定性,使用热导率仪、万用表和微机控制电子万能试验机测试了复合材料的导热性能、导电性能和力学性能。研究表明,在加入了碳纳米管后,MXD6的热导率、电导率和拉伸强度有了显著的提升。当复合材料中MXD6的质量分数为94.84%时,复合材料的拉伸强度达到了540.3 MPa,提高了6倍,并且复合材料的电导率达到24.814 S/cm,热导率为1.453 W/(m·K),有效地拓展了MXD6的应用范围。

关键词: 碳纳米管薄膜;聚间二甲苯己二酰胺;导热性能;导电性能;力学性能

中图分类号: TQ323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)03-0040-06

Multi-Walled Carbon Nanotube Buckypaper Reinforced Poly (m-xylene adipamide) Composites

Guo Xin, Li Yingchun, Wang Wensheng, Meng Xiangning

(School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract : Multi-walled carbon nanotube buckypaper (BP) can improve the mechanical properties, thermal and electrical conductivity of materials, and have great application potential in the preparation of thermoplastic composites. Polym-xylene adipamide (MXD6)/multi-wall carbon nanotube buckypaper (BP) composites were prepared by solution impregnation followed by hot pressing. The effects of BP content on thermal conductivity, conductivity and tensile strength of the composites were investigated. The π - π conjugation effect between carbon nanotubes and MXD6 was confirmed by Fourier infrared spectroscopy (FTIR), and the distribution of MXD6 around carbon nanotubes was observed by scanning electron microscopy (SEM). The crystallization properties and thermal stability of the composites were characterized by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric (TG) test. The thermal conductivity, electrical conductivity and mechanical properties of the composites were tested by thermal conductivity meter, multimeter and microcomputer controlled electronic universal testing machine. The results show that the thermal conductivity, electrical conductivity and tensile strength of the MXD6 have been significantly improved by the addition of carbon nanotubes. When the content of MXD6 in composites is 94.84 wt%, the tensile strength of the composites reaches 540.3 MPa, which increases by 6 times, and the conductivity of the composites reaches 24.814 S/cm, and the thermal conductivity is 1.453 W/(m·K), which effectively expands the application range of MXD6.

Keywords : carbon nanotube buckypaper ; polym-xylene adipamide ; thermal conductivity ; electrical conductivity ; mechanical property

聚间二甲苯己二酰胺(MXD6)作为半芳香族尼龙,分子链上既有苯环,又有酰胺键和较长的脂肪

链^[1],因此,MXD6具有比脂肪族尼龙更高的强度、弹性模量和玻璃化转变温度,并且具有透湿性低、

通信作者:李迎春,博士,教授,主要从事塑料的功能化和高性能化研究

收稿日期:2023-01-03

引用格式:郭欣,李迎春,王文生,等.多壁碳纳米管薄膜增强聚间二甲苯己二酰胺复合材料[J].工程塑料应用,2023,51(3):40-45.

Guo Xin, Li Yingchun, Wang Wensheng, et al. Multi-walled carbon nanotube buckypaper reinforced poly (m-xylene adipamide) composites [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):40-45.

结晶速度快^[2]等特点,即使在高湿度的环境下也可以对二氧化碳和氧气有很好的阻隔性能^[3]。但是MXD6材料在导电和导热等方面的性能较差^[4-5],而碳纳米管独特的优势可以显著提高聚合物的导热性能、导电性能和力学性能^[6],因此可以使用碳纳米管对MXD6进行改性,提高材料的各项性能。近年来,一些学者在使用碳纳米管对尼龙材料进行改性时^[7],会面临碳纳米管的团聚问题,导致复合材料性能很难达到预期效果。

多壁碳纳米管薄膜(BP)作为碳纳米管的宏观材料,通常通过对多壁碳纳米管悬浮液进行抽滤来制备^[8]。所制备的碳纳米管薄膜中的碳纳米管通过范德华力以随机方式固定在一起,该结构可被视为碳纳米管网状结构^[9],解决了碳纳米管在基体中不能均匀分散的问题,同时保留了单根碳纳米管良好的导热性和导电性。但是,在使用BP制备聚合物/BP复合材料时,很多学者都选择了使用热固性塑料作为基体^[10-12],因为热塑性塑料通常比较难与BP在加工时形成良好的交联互通结构,导电性、热稳定性和热导率等性能的提高,是以牺牲拉伸强度作为代价的^[13]。

笔者首先制备MXD6/甲酸溶液,然后将BP浸入其中,使MXD6溶液浸入BP内部的微孔,再通过热压制备出MXD6/BP复合材料^[10]。利用MXD6中的苯环与碳纳米管之间发生的 π - π 共轭效应^[14],使MXD6紧紧包裹在碳纳米管周围,以此来提高复合材料的各项性能。使用傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析复合材料中含有的基团;通过扫描电子显微镜(SEM)表征MXD6在碳纳米管周围的分布;利用差示扫描量热(DSC)法探究BP加入后对MXD6结晶行为产生的影响;通过热重(TG)分析表征BP加入后对MXD6的热稳定性产生的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

MXD6:1002H,日本三菱化学公司;

聚乙二醇辛基苯基醚:TritonX-100,生化试剂级,上海阿拉丁控股集团有限公司;

甲酸:分析纯,天津天力化学试剂有限公司。

1.2 主要设备及仪器

数控超声波清洗器:KQ-3200DE型,昆山市超声仪器有限公司;

平板硫化仪:TY-7006型,江苏天源试验设备有

限公司;

微机控制电子万能试验机:CMT6104型,深圳新三思材料检测有限公司;

FTIR仪:Tebsor-27型,德国Bruker光谱有限公司;

DSC仪:DSC-3-STAR型,瑞士梅特勒-托利多集团;

TG分析仪:Q-50型,瑞士梅特勒-托利多集团;

热导率仪:TC3100型,西安夏溪电子科技有限公司;

万用表:UT-33型,优利德(中国)科技有限公司;

SEM:S-530型,日本日立公司。

1.3 BP及MXD6/BP复合材料制备

将TritonX-100与多壁碳纳米管按照质量比20/1进行混合,在150 kW下水浴超声搅拌1 h,以6 000 r/min的速度进行离心10 min,取上层60%清液,通过真空抽滤法制得BP,孔隙率30%左右。

将MXD6置于真空干燥箱中在80 °C下干燥8 h,除去材料在空气中所吸收的水分。将MXD6与甲酸按照一定的比例配制溶液。将BP裁剪后进行称重,分别放入不同浓度的MXD6甲酸溶液中,在超声功率100 W、频率20 kHz下超声10 min,然后在80 °C真空干燥箱中干燥12 h,最后用平板硫化机在210 °C下热压10 min、冷压5 min后取出,即得到MXD6/BP复合材料。将所制得的MXD6/BP复合材料进行称重,通过计算前后质量差来得出BP和MXD6在复合材料中的含量,结果列于表1。

表1 MXD6/甲酸溶液配方及BP和MXD6质量分数

试样编号	MXD6/甲酸溶液质量 浓度/%	BP质量分 数/%	MXD6质 量分数/%
1 [#]	0.826	6.88	93.12
2 [#]	1.639	5.35	94.65
3 [#]	4.000	5.16	94.84
4 [#]	5.512	4.32	95.68
5 [#]	6.977	3.28	96.72

1.4 性能测试

(1) FTIR测试。

将MXD6/BP复合材料和MXD6的反射红外光谱分别记录在光谱仪上,范围为1 000~3 500 cm⁻¹,分辨率4 cm⁻¹,扫描次数64次。所有样品在80 °C真空干燥箱干燥8 h后进行测试。

(2) SEM分析。

裁剪2 mm×2 mm的MXD6/BP复合材料样

品,采用SEM观察试样表面微观形态,扫描电压为10 kV。

(3)导电性能测试。

裁剪10 mm×10 mm的MXD6/BP复合材料样品,将样品在80℃真空干燥箱干燥8 h后,三次测量样品厚度求平均值,采用数字万用表使用两端子法测量样品电阻,通过公式(1)计算电导率 σ 。

$$\sigma = \frac{1}{R \cdot \frac{S}{L}} \quad (1)$$

式中: R ——电阻, Ω ;

S ——样品的横截面积, m^2 ;

L ——薄膜长度, m 。

(4)导热性能测试。

在恒温25℃的条件下测试热导率,采样时间5 s,电压1.5 V测试。

(5)力学性能测试。

拉伸性能按照ASTM-D882-2009测试,拉伸速率5 mm/min。

(6) TG测试。

在 N_2 保护下以20℃/min的升温速率从25℃升至600℃,记录样品的TG-DTG曲线。所有样品在80℃真空干燥箱干燥8 h后测试。

(7) DSC测试。

在 N_2 保护下以10℃/min的速率从25℃升温至300℃,保温10 min,再以相同的速率降温至25℃,再升温至300℃,记录降温及第二次升温的数据。所有样品在80℃真空干燥箱干燥8 h后测试。

2 结果与讨论

2.1 FTIR分析

图1是BP及MXD6/BP复合材料在1000~4000 cm^{-1} 范围的FTIR谱图。为了证明BP与MXD6之间产生的 π - π 共轭效应,将MXD6与复合材料进行了对比。结果发现,MXD6原本在1535 cm^{-1} 处出现的酰胺基中C—N伸缩振动吸收峰,在MXD6/BP复合材料中出现在了1585 cm^{-1} 处,而MXD6在1635 cm^{-1} 处出现的羰基的特征吸收峰也在MXD6/BP复合材料中移动到了1683 cm^{-1} 处,基团出现蓝移现象证实了BP与MXD6之间的 π - π 共轭效应。这些结果与之前报道的文献一致^[15],证实了复合薄膜中MXD6与碳纳米管之间 π - π 共轭效应的产生。

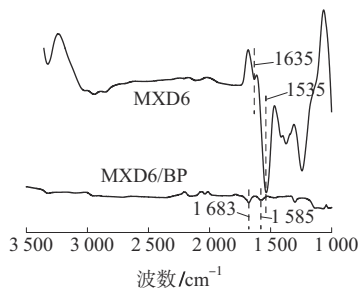
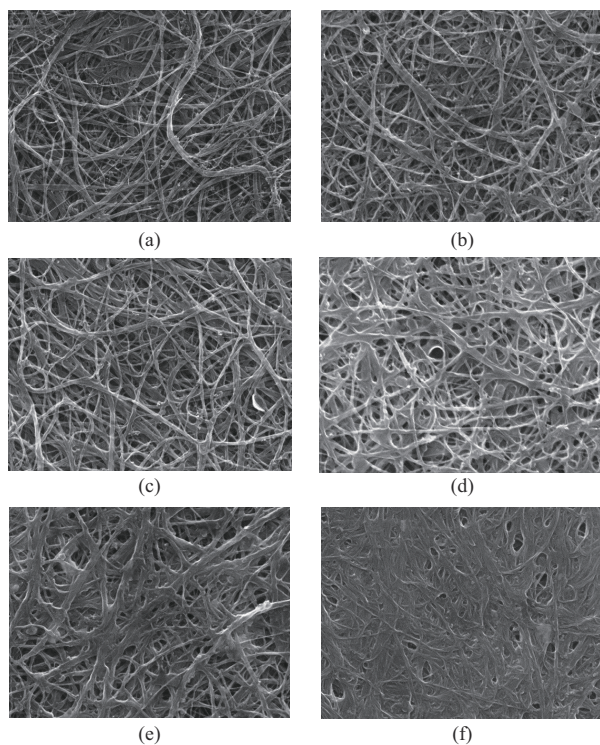


图1 MXD6与MXD6/BP复合材料的FTIR谱图

2.2 MXD6/BP复合材料的微观形貌

利用SEM观察BP及MXD6/BP复合材料的表面形貌,其照片如图2所示。由图2a能够明显看出BP的网状结构。由SEM的成像原理可知,导电率越高的材料在SEM下成像越暗,因此图中较亮的部分为尼龙,并且可以看出MXD6在BP中的分布情况,即包裹在碳纳米管纤维周围(图2b、图2c所示)。相比较于BP内部的蓬松多孔网状结构,当MXD6质量分数到达94.84%时,MXD6/BP复合材料的内部孔隙被MXD6填充(图2d)。但随着MXD6含量进一步的增加,MXD6在填充了BP孔隙之后,还有一部分附着在复合薄膜表面(图2e、图2f所示),且在试样没有喷金的情况下,导致试样表面的导电性较差。在利用SEM观察时,过量电荷不能被及时带



a—BP; MXD6质量分数:b—93.12%; c—94.65%; d—94.84%; e—95.68%; f—96.72%

图2 BP及MXD6/BP复合材料表面形貌SEM照片

走,在试样表面形成累积,导致图像显示较暗^[16]。但仍能清楚地看到MXD6一部分分布在碳纳米管周围,还有大量的MXD6附着在表面。从SEM中能清晰地看出,MXD6能够在超声能量的驱动下穿过BP的微孔结构,包裹在碳纳米管周围,二者之间通过紧密的结合形成相互连接、相互支撑的复合结构。

2.3 MXD6/BP复合材料的电学性能

通过万用表测量了样品的电阻,根据测试样品的长度和厚度计算出MXD6/BP复合材料的电导率,如图3所示。从图3可以看出,当MXD6在复合材料中占比不同时,复合材料的电导率也不同,MXD6质量分数为94.84%时复合材料的电导率下降到了24.814 S/cm。MXD6质量分数为93.12%时复合材料的电导率为39.68 S/cm,而当MXD6质量分数为96.72%时,复合材料的电导率降低到了12.11 S/cm,降低了69.48%。说明复合材料在制备过程中,MXD6的含量对复合材料的导电性能起着主导作用,这是因为MXD6本身是不导电的聚合物,而碳纳米管具有极好的导电性能,当MXD6附着在碳纳米管周围时,会影响到复合材料的导电性能。当复合材料中MXD6的含量越多,复合材料的导电性就越差。因此,复合材料的电导率随着MXD6含量的增加而减小。但通常情况下MXD6具有优异的电绝缘性,电导率为 10^{-12} S/cm,改性后的复合材料导电性能有了大幅提升^[17]。

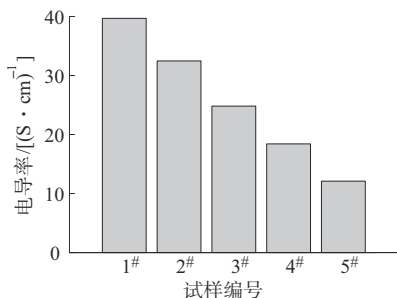


图3 MXD6/BP复合材料的电导率

2.4 MXD6/BP复合材料的热学性能

MXD6/BP复合材料的导热性能优异,热导率如图4所示。由图4可见,当MXD6质量分数为93.12%时,热导率可以达到1.455 W/(m·K),但是随着MXD6质量分数的增加,碳纳米管负载量相对减少,导热性能也随之下降。当MXD6质量分数为94.84%时,热导率为1.453 W/(m·K)。当MXD6质量分数从93.12%增加到96.72%时,复合材料的热导率从1.455 W/(m·K)降到1.395 W/(m·K),降低了

4.3%。说明MXD6含量的变化对复合材料的导热性能起着主导的作用。所以,当复合材料中的MXD6含量越高,碳纳米管负载量相对越少,导致复合材料的导热性能就越差,即复合材料的热导率随着MXD6含量的增加而减小。通常MXD6的热导率为0.25 W/(m·K),在加入了碳纳米管之后,复合材料的导热性能有了大幅提升^[17]。

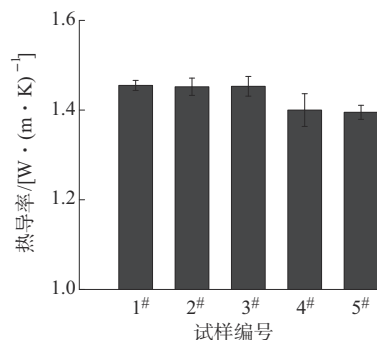


图4 MXD6/BP复合材料的热导率

2.5 MXD6/BP复合材料的力学性能

图5为不同MXD6含量的MXD6/BP复合材料在进行拉伸测试后得到的应力-应变曲线。从图5可以看到,在拉伸初始阶段复合材料明显展现出了线性弹性行为,在MXD6质量分数为94.84%时,复合材料的拉伸强度最高能够达到540.3 MPa,断裂伸长率达到23.8%,这与通常情况下MXD6的拉伸强度80 MPa左右相比,提高了6倍左右,断裂伸长率也有大幅度的提升,提高了MXD6的应用价值。复合材料中的拉伸强度随着MXD6含量的增加呈现出了先升高后降低的趋势,但是总体看来都比MXD6本身的拉伸强度高,相比纯BP的强度也有明显的提升。在MXD6含量低时,BP内部有许多间隙并没有被填充,导致碳纳米管与MXD6之间的连接强度降低,所以拉伸强度仍然有提升的空间。但随着MXD6的含量进一步增加,除了浸渍到BP的孔隙中以外,在薄膜表面也有大量的残留,这也在

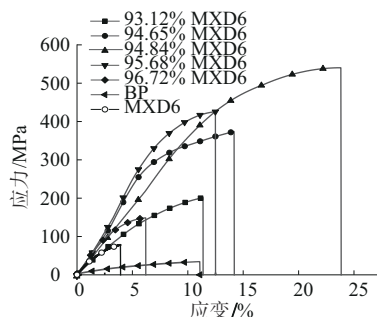


图5 不同MXD6含量的MXD6/BP复合材料应力-应变曲线

一定程度上降低了复合材料的力学性能。

2.6 MXD6/BP复合材料的热稳定性能

图6为不同MXD6含量的MXD6/BP复合材料的TG曲线和DTG曲线。从图6b可以看出,MXD6/BP复合材料的分解速率峰值温度相比于纯MXD6提升了至少15℃,并且可以看出MXD6在320℃左右开始分解,并且在360℃时分解速率达到最大。复合材料的开始分解温度与纯MXD6相比并没有明显的提高,主要是因为一部分MXD6包裹在BP表面,而BP并没有有效对这层MXD6产生保护作用,而随着表层MXD6的分解,可以明显看出分解速率曲线峰值向着高温区移动,这说明了BP有效影响了MXD6的热分解,碳纳米管优异的热传导性能将MXD6在进行热分解时所需要的热量进行了转移和分散。由图6a可以看出升温至450℃时,纯MXD6已经完全分解,但是复合材料的图像中存在两个拐点,第一个拐点在310℃,第二个拐点在450℃左右,代表BP中的一些无定形碳开始分解。

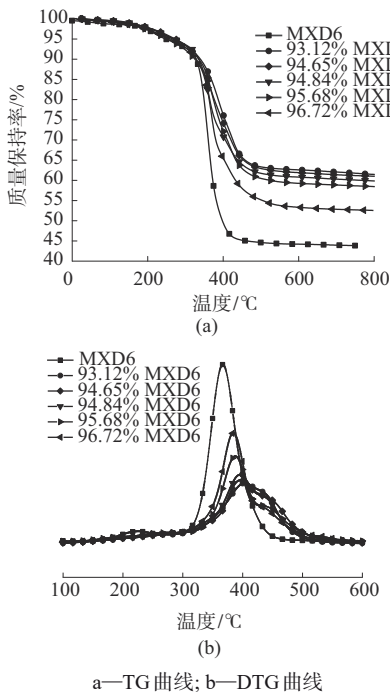
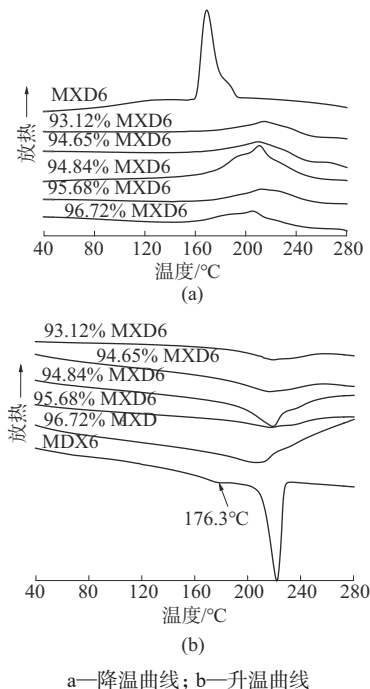


图6 不同MXD6含量的MXD6/BP复合材料的TG曲线和DTG曲线

2.7 MXD6/BP复合材料的结晶行为

MXD6作为半结晶聚合物,结晶过程对它的性能起着十分重要的作用,结晶行为在一定程度上影响了材料的特性。MXD6/BP复合材料的DSC曲线如图7所示。实验的温变速率为10℃/min,为了消除残余热历史对材料熔融的影响,所得的曲线为第二次熔融曲线。对图7中的DSC曲线进行分析,得

到MXD6/BP复合材料的非等温结晶性能数据列于表2。



a—降温曲线; b—升温曲线

图7 MXD6/BP复合材料的DSC曲线

表2 MXD6/BP复合材料结晶数据表

MXD6质量 分数/%	$T_p/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$X_c/\%$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
100	168.61	19.41	28.32	221.42	45.79
93.12	215.12	46.51	7.70	218.47	17.05
94.65	210.83	45.6	8.96	216.02	13.01
94.84	210.88	47.41	10.98	218.84	21.11
95.68	212.63	46.92	14.88	217.44	24.68
96.72	208.41	48.56	15.28	210.70	22.33

注: T_p —结晶峰温度; ΔT —最终结晶温度与起始结晶温度的差值; X_c —结晶度; T_m —熔融温度; ΔH_m —实际熔融焓。

从图7a可以看出,MXD6/BP复合材料的结晶峰和纯MXD6的结晶峰均为单峰,但是明显能看出由于碳纳米管的存在导致复合材料的结晶峰曲线变宽,开始结晶温度变高,说明碳纳米管在复合材料中作为异相会率先成核,并且在复合材料中碳纳米管周围会优先诱导结晶,提高了起始结晶温度。由表2可以看出,复合材料的结晶温度提高了45℃,但是结晶度随着MXD6含量的降低而下降。这也能看出虽然复合材料优先进行了结晶,但是结晶时间明显变长,这是由于致密和缠结的碳纳米管网状结构对MXD6链段的扩散施加了强烈的阻碍作用,减缓了结晶过程的进行。同时,通过图7b可以看出MXD6/BP复合材料的熔融温度相比纯MXD6有所下降,但是相差并不大。在纯MXD6的

熔融曲线中可以明显看出在主吸热峰之前的176.3 °C处出现了一个肩部吸收峰,这是MXD6在一次结晶过程中形成的晶体熔化的特征^[7]。而在复合材料的熔融曲线中并不能观察到肩部吸收峰,这也说明了碳纳米管的存在影响了MXD6的结晶行为,较大比例的MXD6分子能够结晶成更完美的晶体,能够重新结晶的比例相对减少。

3 结论

(1)使用先溶液浸渍后热压成型的方法,通过控制MXD6/甲酸溶液的浓度制备了BP含量不同MXD6/BP复合材料,提高了MXD6的拉伸强度。

(2)通过SEM观测到MXD6在BP内的分布情况,证明了MXD6包裹填充在碳纳米管周围,并通过FTIR证实了 π - π 共轭效应的存在。

(3)通过DSC测试表征了碳纳米管对MXD6结晶具有异相成核作用,提高了结晶温度并且使结晶速率放缓。

(4)通过TG测试证明了碳纳米管的加入使复合材料的热稳定性也有了一定的提高。

(5)当MXD6/甲酸溶液的配比中MXD6质量分数为4%时,复合材料中MXD6的质量分数为94.84%,此时拉伸强度最高,达到540.3 MPa,与纯MXD6相比提高了6倍左右,虽然导电性能和导热性能相比纯BP有所下降,但是与MXD6较差的导热性能和导电性能相比有了显著提升。

参考文献

- [1] 伍威,曹凯凯,高敬民,等. 共聚改性尼龙MXD6的制备与表征[J]. 塑料工业,2018,46(8):51-54.
Wu Wei, Cao Kaikai, Gao Jingmin, et al. Preparation and characterization of MXD6 type copolymerized nylon[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(8):51-54.
- [2] 曾鹏,朱晓岗,杨杰,等. Jeziorny法分析尼龙MXD6非等温结晶行为[J]. 科技视界,2017(29):43-44.
Zeng Peng, Zhu Xiaogang, Yang Jie, et al. Jeziorny method to analyze the non-isothermal crystallization behavior of nylon MXD6[J]. Science & Technology Vision, 2017(29):43-44.
- [3] Doudou B B, Dargent E, Grenet J. Crystallization and melting behaviour of poly(m-xylylene adipamide) [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2006, 85(2):409-415.
- [4] Samperi F, Montaudo M S, Battiatto S, et al. Characterization of copolyesteramides from reactive blending of PET and MXD6 in the molten state[J]. Journal of Polymer Science Part A-Polymer Chemistry, 2010, 48(22):5135-5155.
- [5] Messin T, Follain N, Guinault A, et al. Confinement effect in PC/MXD6 multilayer films: Impact of the microlayered structure on water and gas barrier properties[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 525:135-145.
- [6] Iurchenkova A A, Fedorovskaya E O, Asanov I P, et al. MWCNT

- buckypaper/polypyrrole nanocomposites for supercapacitor application[J]. Electrochimica Acta, 2020, 335. DOI: 10.1016/j.elect-acta.2020.135700.
- [7] Guo Y L, Zhang R Z, Wu K, et al. Preparation of nylon MXD6/EG/CNTs ternary composites with excellent thermal conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2017, 35(12):1497-1507.
- [8] He X W, Gao W L, Xie L J, et al. Wafer-scale monodomain films of spontaneously aligned single-walled carbon nanotubes[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(7). DOI:10.1038/nnano.2016.44.
- [9] 王灏珉,何茂帅,张莹莹. 碳纳米管薄膜的制备及其在柔性电子器件中的应用[J]. 物理化学学报, 2019, 35(11):1207-1223.
Wang Haomin, He Maoshuai, Zhang Yingying. Carbon nanotube films: Preparation and application in flexible electronics[J]. Acta Phys-Chim Sin, 2019, 35(11):1207-1223.
- [10] Diez-Pascual A M, Guan J, Simard B, et al. Poly(phenylene sulphide) and poly(ether ether ketone) composites reinforced with single-walled carbon nanotube buckypaper: I - Structure, thermal stability and crystallization behaviour[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(6):997-1006.
- [11] 李强,殷新意,于妍妍,等. 取向碳纳米管/环氧树脂复合薄膜制备及结构与性能表征[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9):2759-2767.
Li Qiang, Yin Xinyi, Yu Yanyan, et al. Preparation and characterization of aligned carbon nanotubes/epoxy composite films[J]. Acta Mater Compos Sin, 2021, 38(9):2759-2767.
- [12] Yang F, Li Y, Zhang S, et al. Functionalization of multiwalled carbon nanotubes and related polyimide/carbon nanotubes composites[J]. Synthetic Metals, 2010, 160(15-16):1805-1808.
- [13] Bi F, Shao J, Xi Z, et al. Synthesis and characterization of copolymers of poly(m-xylylene adipamide) and poly(ethylene terephthalate) oligomers by melt copolycondensation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(9):1290-1297.
- [14] Rojas J A, Ardila-Rodriguez L A, Diniz M F, et al. Optimization of Triton X-100 removal and ultrasound probe parameters in the preparation of multiwalled carbon nanotube buckypaper[J]. Materials & Design, 2019, 166. DOI:10.1016/j.matdes.2019.107612.
- [15] Chen J, Liu H, Weimer W A, et al. Noncovalent engineering of carbon nanotube surfaces by rigid, functional conjugated polymers [J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 124(31):9034-9035.
- [16] 汪一聪,王丹,李嘉铭,等. 扫描电镜条件对不导电样品表面荷电现象的影响[J]. 广东化工, 2022, 49(11):216-219, 227.
Wang Yicong, Wang Dan, Li Jiaming, et al. Effect of SEM conditions on charging phenomenon on the surface of non-conductive samples[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(11):216-219, 277.
- [17] 郭怡兰,陈枫,傅强. 2016年全国高分子材料科学与工程研讨会论文集[C]. 南京:中国化学会, 2016.
Guo Yilan, Chen Feng, Fu Qiang. 2016 National Symposium on Polymer Materials Science and Engineering proceedings[C]. Nanjing: Chinese Chemical Society, 2016.
- [18] Zhao Z, Tan Y, Guo S, et al. An efficient composite modifier prepared for enhancing the crystallization and flame-retardancy of poly(m-xylylene adipamide)[J]. Polymers, 2022, 14(17). DOI: 10.3390/polym14173626.